

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2003 年 9 月 4 日 (04.09.2003)

PCT

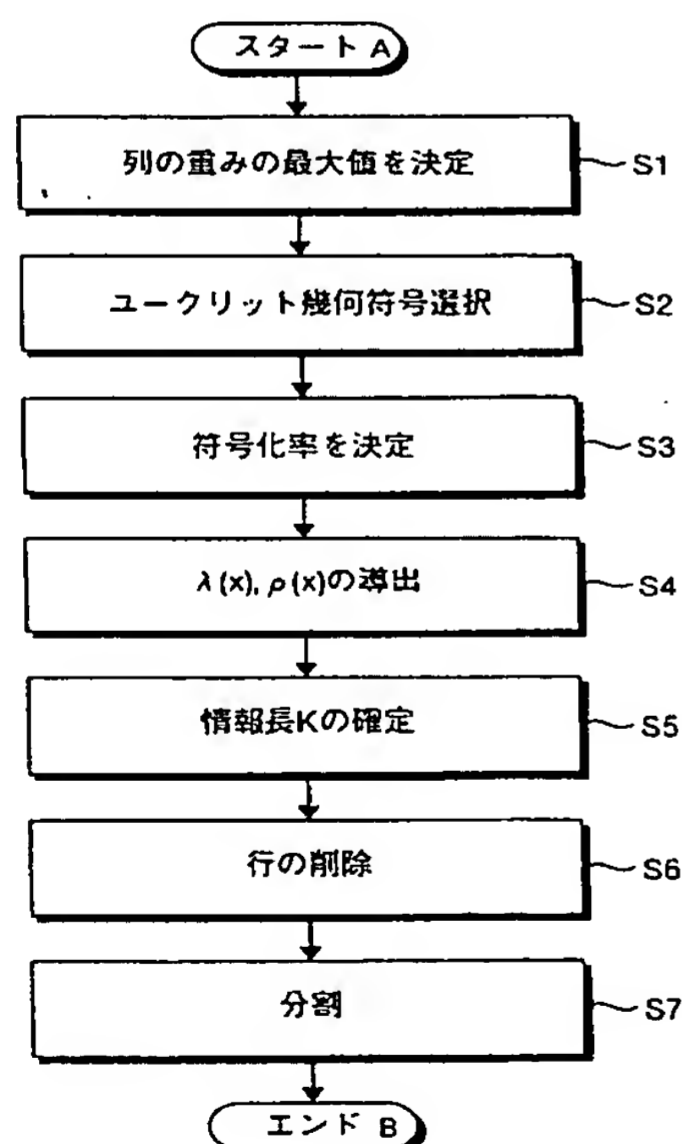
(10) 国際公開番号
WO 03/073621 A1

- (51) 国際特許分類⁷: H03M 13/19 (72) 発明者; および
(21) 国際出願番号: PCT/JP03/02331 (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 松本 渉 (MATSUMOTO, Wataru) [JP/JP]; 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号三菱電機株式会社内 Tokyo (JP).
(22) 国際出願日: 2003 年 2 月 28 日 (28.02.2003)
(25) 国際出願の言語: 日本語 (74) 代理人: 酒井 宏明 (SAKAI, Hiroaki); 〒100-0013 東京都千代田区霞が関三丁目2番6号東京倶楽部ビルディング Tokyo (JP).
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ: (81) 指定国 (国内): CN, JP, US.
特願2002-53888 2002 年 2 月 28 日 (28.02.2002) JP (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR).
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 三菱電機株式会社 (MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 Tokyo (JP).
添付公開書類:
— 国際調査報告書

[続葉有]

(54) Title: LDPC CODE INSPECTION MATRIX GENERATION METHOD AND INSPECTION MATRIX GENERATION DEVICE

(54) 発明の名称: LDPC符号用検査行列生成方法および検査行列生成装置



A...START
S1...DECIDE MAXIMUM VALUE OF ROW WEIGHT
S2...SELECT EUCLID GEOMETRY CODE
S3...DECIDE CODING RATIO
S4...CALCULATE $\lambda(x)$, $\rho(x)$
S5...DECIDE INFORMATION LENGTH K
S6...ROW DELETION
S7...DIVISION
B...END

(57) Abstract: An LDPC code inspection matrix generation method includes a decision step of deciding a maximum value of column weight, a Euclid geometry code as a reference, and a coding ratio, a weight search step of using one-time linear plan method to search an appropriate ensemble of the row weight and the column weight so that the Gauss noise is maximum with the coding ratio fixed, an information length calculation step of calculating an information length according to a predetermined block length and the coding ratio, a row deletion step of deleting a predetermined row according to the information length by using the Euclid geometry code, and a division step of dividing at random the row or column weight of the matrix after the row deletion by a predetermined procedure.

(57) 要約: 本発明のLDPC符号用検査行列生成方法では、列の重みの最大値、基本となるユークリット幾何符号、符号化率、を決定する各決定ステップと、前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを1回の線形計画法で探索する重み探索ステップと、所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出ステップと、前記ユークリット幾何符号を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除ステップと、前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割ステップと、を有する。

WO 03/073621 A1



2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

LDPC符号用検査行列生成方法および検査行列生成装置

5 技術分野

本発明は、誤り訂正符号としてLDPC (Low-Density Parity-Check) 符号を採用した場合におけるLDPC符号用検査行列生成方法に関するものである。

背景技術

10 第27図は、LDPC符号化／復号システムを示す図である。第27図において、101は符号化器であり、102は変調器であり、103は通信路であり、104は復調器であり、105は復号器である。ここでは、従来のLDPC符号用検査行列生成方法を説明する前に、LDPC符号を使用した場合の符号化、復号の流れについて説明する。

15 まず、送信側の符号化器101では、後述する所定の方法で検査行列Hを生成する。そして、以下の条件に基づいて生成行列Gを求める。

$G : k \times n$ 行列 (k : 情報長, n : 符号語長)

$GH^T = 0$ (T は転置行列)

その後、符号化器101では、情報長 k のメッセージ($m_1 m_2 \dots m_k$)を受け取り、上記生成行列Gを用いて符号語Cを生成する。

$$\begin{aligned} C &= (m_1 m_2 \dots m_k) G \\ &= (c_1 c_2 \dots c_n) \quad (\text{ただし、} H (c_1 c_2 \dots c_n)^T = 0) \end{aligned}$$

そして、変調器102では、生成した符号語Cに対して、BPSK, QPSK, 多値QAMなどのデジタル変調を行い、送信する。

25 一方、受信側では、復調器104が、通信路103を介して受け取った変調信号に対して、BPSK, QPSK, 多値QAMなどのデジタル復調を行い、さらに、復号器105が、LDPC符号化された復調結果に対して、「sum-pr

product アルゴリズム」による繰り返し復号を実施し、推定結果（もとの m_1, m_2, \dots, m_k に対応）を出力する。

以下、従来の LDPC 符号用検査行列生成方法について説明する。LDPC 符号用の検査行列としては、たとえば、LDPC の発案者 Gallager により
5 以下のような行列が提案されている（第 28 図参照）。

第 28 図に示す行列は、「1」と「0」の 2 値の行列で、「1」の部分塗りつぶしている。他の部分は全て「0」である。この行列は、1 行の「1」の数（これを 10 行の重みと表現する）が 4 で、1 列の「1」の数（これを列の重みと表現する）が 3 であり、全ての列と行の重みが均一なため、これを一般に「Regular-LDPC 符号」と呼んでいる。また、Gallager の符号では、たとえば、第 28 図に示すように、行列を 3 ブロックに分け、2 ブロック目と 3 ブロック目に対してランダム置換を行っている。

しかしながら、このランダム置換には、所定のルールがないため、より特性の良好な符号を見つけるためには、計算機による時間のかかる探索を行わなければ
15 ならなかった。

そこで、たとえば、計算機探索によらなくても確定的に行列を生成でき、比較的安定した良好な特性を示す LDPC 符号として、ユークリット幾何符号を用いる方法が、Y. Kou 等 (Y. Kou, S. Lin, and M. P. C. Fossorier, "Low Density Parity Check Codes Based on Finite Geometries: A Rediscovery," ISIT
20 2000, pp. 200, Sorrento, Italy, June 25-30, 2000.) によって提案された。この方法では、規則的な ensemble (アンサンブル) で構成された「Regular-LDPC 符号」について説明されている。

ここでは、有限幾何符号の一種であるユークリット幾何符号 $EG(2, 2^6)$ を用いて LDPC 符号の検査行列を生成する方法が提案されており、誤り率 10^{-4} 点において、シャノン限界から 1.45 dB に接近した特性を得ている。第
25 29 図は、たとえば、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^6)$ の構成を示す図であり、行、列のそれぞれの重みが 4, 4 の「Regular-LDPC 符号」構

造をしている。

したがって、ユークリット幾何符号 $EG(m, 2^s)$ の場合、その特性は、以下のよう規定される。

- 符号長 : $n = 2^{2s} - 1$
- 5 冗長ビット長 : $n - k = 3^s - 1$
- 情報長 : $k = 2^{2s} - 3^s$
- 最小距離 : $d_{\min} = 2^s + 1$
- 密度 : $r = 2^s / (2^{2s} - 1)$

第29図を見ても分かるように、ユークリット幾何符号は、各行の「1」の配置が行毎に巡回シフトした構造になっており、符号が容易にかつ確定的に構成できる特長がある。

Y. Kouらによる検査行列の生成方法では、さらに、上記ユークリット幾何符号に基づいて行と列の重みを変更し、行、列を必要に応じて拡張している。たとえば、 $EG(2, 2^2)$ の列の重みを $1/2$ に分離する場合、Y. Kouらの論文では、1列内に4つある重みを1つ置きに2個ずつ分離する。第30図は、列の重みを4から2に規則的に分離した例を示す図である。

一方、上記「Regular-LDPC符号」の特性よりも「Irregular-LDPC符号」の特性の方が良好であることが、Luby等 (M. G. Luby, M. Mitzenmacher, M. A. Shokrollahi, and D. A. Spielman, "Improved Low-Density Parity-Check Codes Using Irregular Graphs and Belief Propagation," Proceedings of 1998 IEEE International Symposium on Information Theory, p. 171, Cambridge, Mass., August 16-21, 1998.) により報告された。なお、上記「Irregular-LDPC符号」は、列と行の重みがそれぞれあるいはどちらか一方が均一でないLDPC符号を表す。

そして、それは、Richardson等 (T. J. Richardson and R. Urbanke, "The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 47, No. 2, pp. 599-618, Feb. 2001.

）、あるいはC h u n g 等 (S.-Y. Chung, T. J. Richardson, and R. Urbanke, "Analysis of Sum-Product Decoding of Low-Density Parity-Check Codes Using a Gaussian Approximation," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 47, No. 2, pp. 657-670, Feb. 2001.) によって理論的に解析された。

5 特に、C h u n g 等は、繰り返し復号器における入力と出力の対数尤度比 (L L R) がガウス分布に近似できると仮定してL D P C 符号の「S u m - P r o d u c t アルゴリズム」を解析し、良好な行と列の重みのアンサンブルを求めている。

しかしながら、たとえば、上記C h u n g 等による従来のL D P C 符号用検査
10 行列生成方法は、行内の「1」の点の数（後述するバリエブルノードの次数配分に相当）と、列内の「1」の点の数（後述するチェックノードの次数配分に相当）と、の両方を変数として、下記の（1）式（r a t e : 符号化率）が最大となるバリエブルノードの次数配分およびチェックノードの次数配分を求めている。
すなわち、S N R (Signal to Noise Ratio) が最小となるアンサンブルを線形
15 計画法により探索している。

$$\text{rate} = 1 - \frac{\int_0^1 \rho(x)}{\int_0^1 \lambda(x)} \quad \dots (1)$$

そのため、上記「r a t e」の最大値により得られる検査行列が流動的になり、
20 特性が安定しない、という問題があった。また、従来のL D P C 符号用検査行列生成方法は、バリエブルノードの次数配分の導出とチェックノードの次数配分の導出とを所定回数にわたって繰り返し行っているため、探索処理にある程度の時間を要する、という問題もあった。

従って、本発明は、確定的で特性が安定し、かつ任意のアンサンブルに対応し
25 たL D P C 符号用の検査行列を、容易に探索可能で、さらに、性能の良好なL D P C 符号用検査行列生成方法を提供することを目的としている。

発明の開示

本発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法にあつては、Irregular-LDPC符号の検査行列を生成するために、列の重みの最大値を決定する重み決定ステップと、前記列の重みの最大値に基づいて基本となるユークリット幾何符号を決定するユークリット幾何符号決定ステップと、符号化率を決定する符号化率決定ステップと、前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索ステップと、所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出ステップと、前記ユークリット幾何符号を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除ステップと、前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割ステップと、を含むことを特徴とする。

つぎの発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法において、前記行削除ステップにあつては、前記アンサンブルに基づいて前記ユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割し、分割後の行数から前記情報長を減算し、その後、前記アンサンブルにおける各重みの比率を調整しながら、前記減算結果に相当する行数を削除することを特徴とする。

つぎの発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法において、前記行削除ステップにあつては、前記基本のユークリット幾何符号から所定の行数を削除し、その後、前記アンサンブルに基づいて当該削除後のユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割することを特徴とする。

つぎの発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法にあつては、前記アンサンブルの重み配分を、重み単位の重み総数が整数で、かつ重み単位の重み総数の総和とユークリット幾何符号の「1」の総数とが等しくなるように調整し、調整後のアンサンブルに基づいて前記分割処理を行うことを特徴とする。

つぎの発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法にあつては、基本のランダム系列のラテン方陣を作成し、当該ラテン方陣に基づいて、前記ユークリット

幾何符号における各行および各列から重み「1」を抽出することにより、各列および各行をランダムに分割することを特徴とする

つぎの発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法にあつては、Irregular-LDPC符号の検査行列を生成するために、所定の多項式を用いて前記ユークリット幾何符号における行または列の重みを分割し、特性劣化の要因となる前記ユークリット幾何符号に存在する「サイクル数6」を削減することを特徴とする。

つぎの発明にかかる検査行列生成装置にあつては、ユークリット幾何符号を用いてIrregular-LDPC符号の検査行列を生成する構成として、列の重みの最大値を決定する重み決定手段と、前記列の重みの最大値に基づいてユークリット幾何符号を決定するユークリット幾何符号決定手段と、符号化率を決定する符号化率決定手段と、前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索手段と、所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出手段と、前記ユークリット幾何符号を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除手段と、前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割手段と、を備えることを特徴とする。

図面の簡単な説明

第1図は、実施の形態1のLDPC符号用検査行列生成方法を示すフローチャートであり、第2図は、 $rate = 0.5$ の時の $\lambda(x)$ と $\rho(x)$ のアンサンブルの一例を示す図であり、第3図は、ユークリット幾何符号EG(2, 2²)を示す図であり、第4図は、第3図に示すユークリット幾何符号EG(2, 2²)における各行の「1」の列番号を示す図であり、第5図は、並べ替えた後の各行の「1」の列番号を示す図であり、第6図は、第5図の下から5行を削除した後の各行の「1」の列番号を示す図であり、第7図は、行削除後の列内の重み分

布を示す図であり、第8図は、ユークリット幾何符号EG (2, 2⁵) における
 5行削除後の重み分布を示す図であり、第9図は、ユークリット幾何符号EG (2, 2⁵) における行を189行だけ削除した場合の重み分布を示す図であり、
 第10図は、分割テーブルの一例を示す図であり、第11図は、重み配分調整用
 5 テーブルを示す図であり、第12図は、重み配分後の生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを示す図であり、第13図は、従来の分割手順を示す図であり、第14図は、分割前のEG (2, 2⁵) のグラフを示す図であり、第15図は、EG (2, 2⁵) のエッジをランダムに選択した分割後のグラフを示す図であり、第16図は、Eb/NoとBERとの関係を示す図であり、第17
 10 図は、「Regular-LDPC符号」のアンサンブルを示す図であり、第18図は、「Irregular-LDPC符号」のアンサンブルを示す図であり、第19図は、基本のランダム系列C(i)と基本のランダム系列の置換パターンLB_j(i)を示す図であり、第20図は、ラテン方阵行列L_{jq}(i)を示す図であり、第21図は、第29図に示すLDPC符号を2部グラフで表現した場合を示す図であり、第22図は、サイクル4およびサイクル6の一例を示す図であり、
 15 第23図は、第3図に示すユークリット幾何符号EG (2, 2²) の各列における「1」の行番号を示す図であり、第24図は、第23図に示す行列を(19)式により分離して列の重みを2にした場合の行列を示す図であり、第25図は、行列c o l (i, j)を単純に前2列と後ろ2列に分離した場合の行列c o l _ s 2 _ 4 (i, j)を示す図であり、第26図は、実施の形態2の方法で分離した場合の行列c o l _ s 2 _ 4 ^ (i, j)を示す図であり、第27図は、LDPC符号化/復号システムを示す図であり、第28図は、従来のLDPC符号用の検査行列を示す図であり、第29図は、ユークリット幾何符号EG (2, 2²) の構成を示す図であり、第30図は、列の重みを4から2に規則的に分離した
 25 例を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

以下に、本発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施の形態によりこの発明が限定されるものではない。

実施の形態 1.

5 第1図は、本発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法を示すフローチャートである。なお、本実施の形態におけるLDPC符号用検査行列生成方法は、たとえば、設定されるパラメータに応じて通信装置内で実行する構成としてもよいし、通信装置外部の他の制御装置（計算機等）で実行することとしてもよい。本実施の形態におけるLDPC符号用検査行列生成方法が通信装置外部で実行される場合は、生成済みのLDPC符号用検査行列が通信装置に格納される。以降
10 の実施の形態では、説明の便宜上、通信装置内で上記方法を実行する場合について説明する。

まず、本実施の形態のLDPC符号用検査行列生成方法を説明する前に、本実施の形態のLDPC符号用検査行列生成方法を実現可能な符号化器および復号器
15 の位置付け、および「Irregular-LDPC符号」用の従来の検査行列生成方法について説明する。なお、LDPC符号化／復号システムの構成については、先に説明した第27図と同様である。

送信側の符号化器101では、後述する本実施の形態のLDPC符号用検査行列生成方法で検査行列Hを生成する。そして、以下の条件に基づいて生成行列G
20 を求める。

$G : k \times n$ 行列 (k : 情報長, n : 符号語長)

$GH^T = 0$ (T は転置行列)

その後、符号化器101では、情報長 k のメッセージ($m_1 m_2 \cdots m_k$)を受け取り、上記生成行列Gを用いて符号語Cを生成する。

25 $C = (m_1 m_2 \cdots m_k) G$
 $= (c_1 c_2 \cdots c_n)$ (ただし、 $H (c_1 c_2 \cdots c_n)^T = 0$)

そして、変調器102では、生成した符号語Cに対して、BPSK, QPSK,

多値QAMなどのデジタル変調を行い、送信する。

一方、受信側では、復調器104が、通信路103を介して受け取った変調信号に対して、BPSK, QPSK, 多値QAMなどのデジタル復調を行い、さらに、復号器105が、LDPC符号化された復調結果に対して、「sum-product
5 productアルゴリズム」による繰り返し復号を実施し、推定結果（もとの m_1
 $m_2 \cdots m_k$ に対応）を出力する。

つぎに、Chung等 (S.-Y. Chung, T. J. Richardson, and R. Urbanke, "Analysis of Sum-Product Decoding of Low-Density Parity-Check Codes Using a Gaussian Approximation," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 47, No. 2, pp. 65
10 7-670, Feb. 2001.) によって理論的に解析された、「Irregular-LDPC符号」用の従来の検査行列生成方法について詳細に説明する。ここでは、繰り返し復号器における入力と出力の対数尤度比 (LLR) がガウス分布に近似できると仮定してLDPC符号の「Sum-Productアルゴリズム」を解析し、良好な行と列の重みのアンサンブルを求めている。

15 なお、上記論文に記述されたLDPC符号用検査行列生成方法であるガウス近似法 (Gaussian Approximation) では、前提として、検査行列における行内の「1」の点をバリアブルノードと定義し、列内の「1」の点をチェックノードと定義する。

まず、チェックノードからバリアブルノードへのLLRメッセージ伝搬を解析
20 する。 $0 < s < \infty$ と $0 \leq t < \infty$ という条件において、以下の関数(2)式を定義する。なお、 $s = m_{u0}$ は u_0 の平均値であり、 u_0 は分散値 σ_n^2 のガウスノイズを含む伝送路を経由して受信した信号の対数尤度比 (LLR) であり、 t は所定の繰り返しの時点におけるチェックノードのLLR出力値のアンサンブル平均である。

$$f_j(s, t) = \phi^{-1} \left(1 - \left[1 - \sum_{i=2}^{d_l} \lambda_i \phi(s + (i-1)t) \right]^{j-1} \right)$$

$$f(s, t) = \sum_{j=2}^{d_r} \rho_j f_j(s, t) \quad \dots (2)$$

なお、上記 $\lambda(x)$ および $\rho(x)$ は、それぞれバリアブルノードおよびチェックノードの次数配分（バリアブルノードとチェックノードの各 1 行、各 1 列内の「1」の数を次数と表現する）の生成関数を表し、(3) 式および (4) 式のように表すことができる。また、 λ_i と ρ_i は、それぞれ次数 i のバリアブルノードとチェックノードに属するエッジの比率を表す。また、 d_l は最大バリアブルノードの次数であり、 d_r は最大チェックノードの次数である。

$$\lambda(x) = \sum_{i=2}^{d_l} \lambda_i x^{i-1} \quad \dots (3)$$

$$\rho(x) = \sum_{i=2}^{d_r} \rho_i x^{i-1} \quad \dots (4)$$

ただし、 $\phi(x)$ は下記 (5) 式のように定義する。

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\sqrt{4\pi x}} \int_R \tanh \frac{u}{2} \cdot e^{-\frac{(u-x)^2}{4x}} du & \text{if } x > 0 \\ 1 & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad \dots (5)$$

そして、(2) 式は、等価的に下記 (6) 式と表すことができる。

$$t_1 = f(s, t_{1-1}) \quad \dots (6)$$

なお、 t_1 は 1 番目の繰り返し時点におけるチェックノードの LLR 出力値の

アンサンブル平均である。

ここで、誤りが0となりうるSNRの限界 (threshold) を求めるための条件は、 $1 \rightarrow \infty$ のときに $t_1(s) \rightarrow \infty$ (R^+ と表現する) となることであり、この条件を満たすためには、以下の条件 (7) 式を満たす必要がある。

5

$$t < f(s, t), \text{ 全ての } t \in R^+ \quad \dots(7)$$

つぎに、バリアブルノードからチェックノードへのLLRメッセージ伝搬を解析する。 $0 < s < \infty$ と $0 < r \leq 1$ という条件において、以下の関数 (8) 式を定義する。なお、 r の初期値 r_0 は $\phi(s)$ である。

10

$$h_i(s, r) = \phi \left(s + (i-1) \sum_{j=2}^{d_r} \rho_j \phi(1 - (1-r)^{j-1}) \right)$$

$$h(s, r) = \sum_{i=2}^{d_l} \lambda_i h_i(s, r) \quad \dots(8)$$

15

そして、(8) 式は、等価的に下記 (9) 式と表すことができる。

$$r_i = h(s, r_{i-1}) \quad \dots(9)$$

ここで、誤りが0となりうるSNRの限界 (threshold) を求めるための条件は、 $r_1(s) \rightarrow 0$ となることであり、この条件を満たすためには、以下の条件

20

(10) 式を満たす必要がある。

$$r > h(s, r), \text{ 全ての } r \in (0, \phi(s)) \quad \dots(10)$$

さらに、上記Chung等の論文では、上記式を用いて以下の手順でバリアブルノードとチェックノードの最適な次数を探索している (ガウス近似法)。

25

(1) 生成関数 $\lambda(x)$ とガウスノイズ σ_n が与えられていると仮定し、生成関数 $\rho(x)$ を変数として、前述した (1) 式が最大となる点を探索する。なお、この探索における拘束条件は、 $\rho(1) = 1$ と正規化することと、上記 (7) 式

を満たすことである。

(2) 生成関数 $\rho(x)$ とガウスノイズ σ_n が与えられていると仮定し (たとえば、(1) の結果より得られる値)、生成関数 $\lambda(x)$ を変数として、(1) 式が最大となる点を探索する。なお、この探索における拘束条件は、 $\lambda(1) = 1$ と正規化することと、上記 (10) 式を満たすことである。

(3) 最大「rate」を求めるために、上記 (1) と上記 (2) を繰り返し実行し、生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ のより良好なアンサンブルを線形計画法で探索する。

(4) 最後に、ガウスノイズ σ_n より信号電力を 1 と正規化して、SNR の限界 (threshold) を求める。

$$\text{threshold(dB)} = -10 * \log_{10}(2 * \sigma_n^2) \quad \dots(11)$$

しかしながら、上記 Chung 等の論文では、「rate (符号化率)」の最大値により得られる検査行列が流動的になり、設計時の仕様として固定される rate が変動してしまう、という問題があった。また、上記 Chung 等の論文では、バリアブルノードの次数配分の導出とチェックノードの次数配分の導出とを所定回数にわたって繰り返し行っているため、探索処理にある程度の時間を要する、という問題や、任意のアンサンブル、任意の符号長、任意の符号化率に容易に対応することができない、という問題もあった。

そこで、本実施の形態においては、確定的で特性が安定し、かつ任意のアンサンブル、任意の符号長、任意の符号化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を、短時間で容易に探索する方法について説明する (第 1 図参照)。具体的にいうと、ここでは、ユークリット幾何符号における 1 行または 1 列の「1」の配置を分割および削除することにより、「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を生成する。第 1 図は、実施の形態 1 の LDPC 符号用検査行列生成方法を示す図である。

本実施の形態の LDPC 符号用検査行列生成方法では、まず、列の重みの最大

値 d_1 を決定する (ステップ S 1)。ここでは、たとえば、 $d_1 = 32$ とする。

つぎに、列の重み d_1 に基づいてベースとなるユークリット幾何符号 $EG(2, 2^s)$ を選択する (ステップ S 2)。たとえば、 $d_1 = 32$ の場合、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^s)$ の列の重み 2^s は $s = 5$ となるため、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ を選択する。一般には、 $2^{s-1} < d_1 < 2^{s+1}$ の条件を満たす s が選択される。

つぎに、符号化率 ($rate$) を決定する (ステップ S 3)。ここでは、たとえば、 $rate = 0.5$ の場合について説明する。

つぎに、後述するガウス近似法を用いて、バリアブルノードの次数配分の生成関数 $\lambda(x)$ と、チェックノードの次数配分の生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを導出する (ステップ S 4)。第 2 図は、 $rate = 0.5$ の時の $\lambda(x)$ と $\rho(x)$ のアンサンブルの一例を示す図である。ただし、 x は重みを表し、 λ_x および ρ_x はそれぞれバリアブルノードとチェックノードの重み配分を表す。また、表中 σ_{GA} はガウス近似法により導出した「threshold」時のノイズ分散値を表し、 $SNR_{norm}(GA)$ はガウス近似法により導出した「threshold」時の SNR とシャノン限界の SNR との差分を表す。

ここで、バリアブルノードの次数配分の生成関数 $\lambda(x)$ とチェックノードの次数配分の生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを探索するための上記ガウス近似法の実行手順について説明する。

(1) 「 $rate$ 」が与えられているものと仮定する。すなわち、要求「 $rate$ 」を固定する。実際の設計では、目標「 $rate$ 」が予め指定されている場合が多いためである。

(2) 生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ を同時に変数として扱い、ガウスノイズ σ_n が最大になるように、線形計画法で最適な生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ を探索する。この探索における拘束条件は、 $\lambda(1) = 1$ 、 $\rho(1) = 1$ と正規化し、さらに上記 (10) 式を満たすことである。

このように、本実施の形態では、上記 (9) 式と上記 (10) 式を満たす生成

関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ を1回の線形計画法で求めることとしたため、上記論文 (chung 等) のように、生成関数 $\lambda(x)$ の導出と生成関数 $\rho(x)$ の導出を繰り返し実行し、双方の最適値を求める方法よりも、容易かつ短時間に、確定的でかつ特性が安定したアンサンブルを生成できる。

- 5 ステップ S 4 においてアンサンブルを導出後、つぎに、ブロック長 N を求め、このブロック長 N から情報長 K を確定する (ステップ S 5)。たとえば、 $N = 5000$ の場合、

$$K = N \times \text{rate} = 5000 \times 0.5 = 2500$$

となる。

- 10 つぎに、情報長 K に対応した行の削除を行う (ステップ S 6)。ここでは、本実施の形態における行の削除方法 (第 1 の削除方法, 第 2 の削除方法) について詳細に説明する。なお、ベースとなるユークリット幾何符号 $EG(2, 2^s)$ の行の数と列の数は、それぞれ $2^s \times 2^s - 1$ で表すことができる。

- 第 1 の削除方法では、まず、第 2 図に示すアンサンブルに基づいて、重み 3 2
15 の 1 行を、重み 1 0 の 1 行と重み 1 1 の 2 行とに分割する。このケースでは、重み 1 0 の比率が $\rho_{10} = 10 / 32 = 0.3125$ となっており、重み 6 の比率 ρ_6 が $\rho_{10} = 22 / 32 = 0.6875$ となっている。また、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ の行の数 R_{EG} は $R_{EG} = 2^5 \times 2^5 - 1 = 1023$ であるため、重み 1 0 の行数が 1023 となり、重み 1 1 の行数が 2046 となり、その結果、トータル
20 の行数 R_T は、 $R_T = 1023 + 2046 = 3069$ となる。したがって、行の削除数 D_r は、検査行列の行数が情報長 K と一致することを利用して、

$$D_r = R_T - K$$

となる。

- 25 なお、上記のように、重み 3 2 の各行を重み 1 0 の 1 行と重み 1 1 の 2 行に分割する場合は、たとえば、後述するランダム分割、すなわち「乱数系列のラテン方陣を用いた分割方法」を実施する。

このように、上記第 1 の削除方法では、たとえば、重み 3 2 の 1 行を重み 1 0

の1行と重み11の2行とに分割する場合、分割後の行列から、 $D_r = R_T - K = 3069 - 2500 = 569$ 行を削除する。このとき、比率 ρ_{10} 、 ρ_{11} をできるだけ変えないように、569行の削除を行う。

一方、第2の削除方法では、基本のユークリット幾何符号EG(2, 2^s)の
5 段階で行の削除を行う。ここでは、基本のユークリット幾何符号EG(2, 2^s)からの削除数 D_{r_EG} を

$$D_{r_EG} = R_{EG} \times (R_T - K) / R_T$$

により求める。たとえば、 $D_{r_EG} = 1023 \times 569 / 3069 = 189.66$

67の場合、ユークリット幾何符号EG(2, 2^5)から189行を削除する。

10 このとき、削除後に行のランダム分割を行った場合であっても、行数は、 $(1023 - 569) \times 3 = 2502$ となり、目標の符号長2500に近い値となる。実際には、ユークリット幾何符号EG(2, 2^5)から189行を削除した後、 $1023 - 189 = 834$ 行分のランダム分割を行って $834 \times 3 = 2502$ 行(各行を重み10の1行と重み11の2行に分割する)とし、その後、残りの2
15 行を削除する。

上記第2の削除方法を、図面を用いて具体的に説明する。ここでは、説明の便宜上、ユークリット幾何符号EG(2, 2^2)を用いる。第3図は、ユークリット幾何符号EG(2, 2^2)を示す図(空白は0を表す)である。また、第4図は、第3図に示すユークリット幾何符号EG(2, 2^2)における各行の「1」
20 の列番号を示す図であり、ここでは、各行の「1」の列番号をRow(i, j)と表現する(iは行番号を表し、jは列番号を表す)。たとえば、ユークリット幾何符号EG(2, 2^2)の1行目は、 $Row(1, j) = \{1, 5, 13, 14\}$ と表現する。

第4図に基づいて、Row(i, j)の1列目が昇順になるように行の順番を
25 並べ替える。第5図は、並べ替えた後の各行の「1」の列番号を示す図であり、ここでは、並べ替え後の各行の「1」の列番号をRow'(i, j)と表現する。

たとえば、削除する行数を5行とした場合、ここでは、Row'(i, j)の

下から5行を削除する。第6図は、第5図の下から5行を削除した後の各行の「1」の列番号を示す図であり、ここでは、削除後の各行の「1」の列番号を $Row_5(i, j)$ と表現する。また、第7図は、行削除後の列内の重み分布を示す図であり、第6図における、列番号とその列に含まれる「1」の数との関係を表している。また、第8図は、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ における5行削除後の重み分布を示す図である。

上記第2の削除方法と同様の手順で、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ における行を189行だけ削除した場合の重み分布を第9図に示す。

ステップS6における削除処理を実行後、最後に、列の分割処理を行う（第10図、ステップS7）。ここでは、本実施の形態における分割方法を、説明の便宜上、第2図を用いて詳細に説明する。なお、重み配分 λ_x の x の値および重み配分 ρ_x の x の値、すなわち、列と行の重みは、それぞれ x の組み合わせで、たとえば、32を構成できる値とする。第10図は、分割テーブルの一例を示す図である。たとえば、 7×4 と 2×2 の組み合わせは、重み32の1列を、重み7の4列と重み2の2列に分割できることを表している。第10図のように、基本となる各行と各列の重みが32のユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ を適切に分割すれば、「Irregular-LDPC符号」用の検査行列が構成できる。また、図示はしていないが、列の重み31, 30, 29, 28, 27, 26, 25, 24, 23, 22, 21に関しても（第9図参照）、同様に分割できる。

まず、分割処理を行う前に、第2図に示す生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルの重み配分を以下の手順で調整する。第11図は、重み配分調整用テーブルを示す図である。

(1) ガウス近似法で求めた生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブル（第2図参照）をテーブルの2列目と3列目に設定する。

(2) 重み配分 λ_x および ρ_x (3列目) と、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ における全行列の「1」の総数 $TP = 26688$ と、を乗算し、重み単位の重み総数を求め、さらに、当該重み単位の重み総数とその総和を4列目に設定する。

(3) 重み単位の重み総数 (4 列目) を対応する重み x で割り、重み単位の総列数を求め、それを 5 列目に設定する。

(4) 重み単位の総列数が小数点以下を含む場合、丸め処理 (四捨五入, 切上げ, 切捨て等) を行い、その結果を 6 列目に設定する。

- 5 (5) 丸め処理後の重み単位の総列数 (6 列目) と対応する重み x とを乗算し、丸め処理後の重み単位の重み総数を求め、それを 7 列目に設定する。そして、各重み総数の総和 (7 列目の合計の行) が行列内の「1」の総数 ($TP = 26688$) と等しいかどうかを確認する。

- 10 (6) 行列内の「1」の総数に等しくない場合、丸め処理後の重み単位の重み総数 (7 列目) を整数単位で調整し、その結果を 8 列目に設定する。この場合、8 列目の総和が、行列内の「1」の総数 ($TP = 26688$) に等しくなるように調整する。

- 15 (7) 調整後の重み単位の重み総数 (8 列目) を対応する重み x で割り、調整後の重み単位の総列数を求め、それを 9 列目に設定する。調整後の各重みの配分 (1 1 列目) は、可能な限りガウス近似法で求めた値 (3 列目) に近い値にする。

第 12 図は、重み配分後の生成関数 $\lambda(x)$ と生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを示す図である。

- 20 つぎに、ユークリット幾何符号における 1 行あるいは 1 列の分割手順について説明する。たとえば、分割手順に関して、Y. Kou 等の論文では、規則的に分割する方法を提示している。第 13 図は、上記論文における分割手順を示す図である。まず、第 13 図に示すように行列のナンバリングを行う。ここでは、列番号を左端から順に 1, 2, 3, ... とし、行番号を上から順に 1, 2, 3, ... とする。そして、たとえば、32 点 \times 1 列を 8 点 \times 4 列に分割する場合、下記 (12) 式にしたがって規則的に分割する。

25

$$S_m(n) = B_1(m + 4 * n) \quad \dots (12)$$

なお、 $m = 1, 2, 3, 4$ とし、 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ とし、

1はEG (2, 2⁵) の列番号を表す。また、B₁ (x) はEG (2, 2⁵) の1列目の「1」の位置を表し、S_m (n) は分割後の行列のm列目の「1」の位置を表す。

5 具体的にいうと、EG (2, 2⁵) における1列中の「1」の位置を示す行番号は、

$$B_1(x) = \{1 \ 32 \ 114 \ 136 \ 149 \ 223 \ 260 \ 382 \ 402 \ 438 \ 467 \ 507 \ 574 \ 579 \ 588 \ 622 \ 634 \ 637 \ 638 \ 676 \ 717 \ 728 \ 790 \ 851 \ 861 \ 879 \ 947 \ 954 \ 971 \ 977 \ 979 \ 998\}$$

となり、その結果、分割後の行列における1～4列目の「1」の位置を示す行番号は、B₁ (x) から「1」の番号が規則的に抽出され、

$$10 \quad S_1(n) = \{1 \ 149 \ 402 \ 574 \ 634 \ 717 \ 861 \ 971\}$$

$$S_2(n) = \{32 \ 223 \ 438 \ 579 \ 637 \ 728 \ 879 \ 977\}$$

$$S_3(n) = \{114 \ 260 \ 467 \ 588 \ 638 \ 790 \ 947 \ 979\}$$

$$S_4(n) = \{136 \ 382 \ 507 \ 622 \ 676 \ 851 \ 954 \ 998\}$$

となる。すなわち、32点×1列が8点×4列に分割される。

15 一方、本実施の形態におけるユークリット幾何符号の分割処理は、上記のように規則的に分割するのではなく、B₁ (x) から「1」の番号をランダムに抽出する。なお、この抽出処理は、ランダム性が保持されるのであればどのような方法を用いてもよい。

したがって、分割後の行列のm列目の「1」の位置の一例をR_m (n) とした場合、R_m (n) は、

$$R_1(n) = \{1 \ 114 \ 574 \ 637 \ 851 \ 879 \ 977 \ 979\}$$

$$R_2(n) = \{32 \ 136 \ 402 \ 467 \ 588 \ 728 \ 861 \ 971\}$$

$$R_3(n) = \{149 \ 260 \ 382 \ 438 \ 579 \ 638 \ 717 \ 998\}$$

$$R_4(n) = \{223 \ 507 \ 622 \ 634 \ 676 \ 790 \ 947 \ 954\}$$

25 となる。

上記のような本実施の形態の分割手順をグラフ上で表現すると、以下のように表現することができる。第14図は、分割前のEG (2, 2⁵) のグラフを示す。

図である。なお、両ノードを結ぶ線はエッジと表現する。第14図では、分割前の1023行×1023列（各行列の重みがそれぞれ32）のユークリット幾何符号を表現している。また、第15図は、EG(2, 2⁵)のエッジをランダムに選択した、分割後のグラフを示す図である。

- 5 ここで、上記で説明したLDPC符号の特性を比較する。第16図は、Eb/No（情報1ビットあたりの信号電力対ノイズ電力比）と誤り率特性（BER）との関係を示す図である。なお、繰り返し回数は50回で、復号法は「Sum-Productアルゴリズム」である。

- 10 なお、図中“Simple regular extended EG(2, 2⁵)”は、Y. Kou等の発案によるEG(2, 2⁵)の規則的な列の分割（従来技術参照）を実施した場合の、rate=0.5の「Regular-LDPC符号」であり、“Random regular extended EG(2, 2⁵)”は、本実施の形態によるEG(2, 2⁵)のランダムな列の分割を実施した場合の、rate=0.5の「Regular-LDPC符号」である。第17図は、上記「Regular-LDPC符号」のアンサンブルを示す図である。

- 15 また、図中“Simple irregular extended EG(2, 2⁵)”は、第18図によって特定されたアンサンブルに対して、Y. Kou等の発案によるEG(2, 2⁵)の規則的な列の分割を実施した場合の、rate=0.5の「Irregular-LDPC符号」であり、“Random irregular extended EG(2, 2⁵)”は、第18図によって特定されたアンサンブルに対して、本実施の形態によるEG(2, 2⁵)のランダムな列の分割を実施した場合の、rate=0.5の「Irregular-LDPC符号」である。第18図は、上記「Irregular-LDPC符号」のアンサンブルを示す図である。

- 20 第16図からわかるように、同一レートでは、「Regular-LDPC符号」より「Irregular-LDPC符号」のほうが性能がよい。また、Y. Kou等の論文のような規則的な分割では、「Irregular-LDPC符号」であって大幅な改善は見込めないが、本実施の形態のランダムな分割を実

施すると性能が画期的に改善される。

このように、本実施の形態においては、まず、列の重みの最大値 d_1 を決定し、つぎに、列の重み d_1 に基づいてベースとなるユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ を選択し、つぎに、符号化率 (rate) を決定し、つぎに、上記ガウス
 5 近似法を用いてバリアブルノードの次数配分の生成関数 $\lambda(x)$ とチェックノードの次数配分の生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを導出し、つぎに、所定のブロック長 N から情報長 K を確定し、つぎに、上記所定の手順で情報長 K に対応した行の削除処理を行い、最後に、上記所定の手順で列の分割処理を行う。これにより、確定的で特性が安定し、かつ任意のアンサンブル、任意の符号長、任意の符号
 10 化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を、短時間で容易に生成できる。

つぎに、上記ランダム分割の一例、すなわち、上記「乱数系列のラテン方陣を用いた分割方法」を詳細に説明する。ここでは、ランダム分割を行う場合のランダム系列を容易かつ確定的に生成する。この方法による利点は、送信側と受信側
 15 が同じランダム系列を生成できることにある。これは、現実のシステムではきわめて重要となる。また、符号特性の条件が正確に規定できる、という利点もある。

(1) 基本のランダム系列を作成する。

以下に、ランダム系列作成の一例を記述する。ここでは、説明の便宜上、ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$ を用いる。ユークリット幾何符号 $EG(2, 2^5)$
 20) の場合、1行に存在する「1」の数は $2^5 = 32$ 個である。

P を $P \geq 2^5$ を満たす最小の素数とした場合、たとえば、 2^5 のときは $P = 37$ となる。ここで、系列長 $P - 5 = 32$ の基本のランダム系列 $C(i)$ を (13) 式にしたがって作成する。

$$\begin{aligned} C(1) &= 1 \\ 25 \quad C(i+1) &= G_0 \times C(i) \pmod{P} \quad \dots (13) \end{aligned}$$

ただし、 $i = 0, 1, \dots, P-2$ とし、 G_0 はガロア体 $GF(P)$ の原始元である。その結果、 $C(i)$ は、

$$C(i) = \{1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 16 \ 32 \ 27 \ 17 \ 34 \ 31 \ 25 \ 13 \ 26 \ 15 \ 30 \ 23 \\ 9 \ 18 \ 36 \ 35 \ 33 \ 29 \ 21 \ 5 \ 10 \ 20 \ 3 \ 6 \ 12 \ 24 \ 11 \ 22 \\ 7 \ 14 \ 28 \ 19\}$$

となる。

- 5 (2) 系列長が $2^5 = 32$ となるように、32より大きい数を削除する。

$$C(i) = \{1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 16 \ 32 \ 27 \ 17 \ 31 \ 25 \ 13 \ 26 \ 15 \ 30 \ 23 \ 9 \\ 18 \ 29 \ 21 \ 5 \ 10 \ 20 \ 3 \ 6 \ 12 \ 24 \ 11 \ 22 \ 7 \ 14 \ 28 \ 19\}$$

(3) 基本のランダム系列を一定間隔で読み出すためにスキップ間隔 $S(j)$ を以下の (14) 式のように定義する。

$$10 \quad S(j) = j \quad j = 1, 2, \dots, 2^s \quad (14)$$

(4) 以下の (15) 式で置換パターン $LB_j(i)$ を作成する。

$$LB_j(i) = ((S(j) \times i) \bmod P) + 1$$

$$j = 1, 2, \dots, 2^s$$

$$i = 1, 2, \dots, P-1 \quad (15)$$

- 15 なお、 $LB_j(i)$ も 2^s より大きい数字は削除する。第19図は、基本のランダム系列 $C(i)$ と基本のランダム系列の置換パターン $LB_j(i)$ を示す図である。

(5) q 列 i 行で j 番目のラテン方陣行列 $L_{jq}(i)$ を以下の (16) 式で算出する。

$$20 \quad L_{jq}(i) = LB_j((q + i - 2) \bmod 2^s + 1)$$

$$j = 1, 2, \dots, 2^s$$

$$i = 1, 2, \dots, 2^s$$

$$q = 1, 2, \dots, 2^s \quad (16)$$

第20図は、ラテン方陣行列 $L_{jq}(i)$ を示す図である。このラテン方陣行列

- 25 $L_{jq}(i)$ は、拡張する対象の行列 (たとえば、第12図に示す行列) の $j \times 32 + q$ 列目の分割パターンを決める。たとえば、削除により短縮された $EG(2, 2^5)$ の 670 列目 $g_{670}(1)$ を

$g_{670}(1) = \{28\ 48\ 84\ 113\ 153\ 220\ 225\ 234\ 268\ 280\ 283\ 284\ 322\ 363\ 374\ 436\ 497\ 507\ 525\ 593\ 600\ 617\ 623\ 625\ 644\ 670\ 701\ 783\ 805\ 818\ 892\ 929\}$ とし、これを重み 6 の 5 列と重み 2 の 1 列に分割する。対応するラテン方阵 $L_{jq}(i)$ は $20 * 32 + 30 = 670$ であるため、

$$5 \quad L_{21,30}(i) = \{13\ 19\ 9\ 10\ 16\ 24\ 25\ 28\ 23\ 5\ 8\ 12\ 31\ 14\ 30\ 21\ 4\ 6\ 17\ 7\ 15\ 29\ 2\ 3\ 27\ 22\ 26\ 18\ 1\ 20\ 32\ 11\}$$

となる。結果として、分割パターンは以下ようになる。

$$\begin{aligned} g_{670,1}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ &= \{322\ 525\ 268\ 280\ 436\ 625\} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \\ 10 \quad g_{670,2}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ &= \{644\ 783\ 623\ 153\ 234\ 284\} \quad i = 7, 8, \dots, 12 \\ g_{670,3}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ &= \{892\ 363\ 818\ 600\ 113\ 220\} \quad i = 13, 14, \dots, 16 \\ g_{670,4}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ 15 \quad &= \{497\ 225\ 374\ 805\ 48\ 84\} \quad i = 17, 18, \dots, 24 \\ g_{670,5}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ &= \{701\ 617\ 670\ 507\ 28\ 593\} \quad i = 25, 26, \dots, 30 \\ g_{670,6}(1) &= g_{670}(L_{21,30}(1)) \\ &= \{929\ 283\} \quad i = 31, 32 \end{aligned}$$

20 実施の形態 2.

LDPC 符号 (LDPC 符号用検査行列) は、一般的な表現方法として、たとえば、2 部グラフ (bipartite graph: 2 種類の要素 (ソフト AND とソフト EX OR) で構成された「tanner graph」) で表現することができる。第 21 図は、一例として、第 29 図に示す LDPC 符号を 2 部グラフで表現した場合を示す図

25 である。このように、上記 2 部グラフ上では、バリアブルノードがソフト AND で表現され、チェックノードがソフト EX OR で表現される。

LDPC 符号を用いた符号化/復号においては、一般的に、2 部グラフ上にサ

イクル4, サイクル6, およびそれ以上のサイクル、がより少ないほど良好な特性を得ることができる。第22図は、サイクル4およびサイクル6の一例を示す図である。

特に、特性が劣化する要因としては、サイクル4の影響度が最も大きく、サイクル数が大きくなるほどその影響は小さくなる。したがって、LDPC符号としては、サイクル4やサイクル6といった少ないサイクルの発生を抑制する構造が望ましい。

そこで、実施の形態2のLDPC符号用検査行列生成方法においては、ユークリット幾何符号に存在するサイクル数6を削減することによって、復号特性の向上を図る。なお、ベースとなるユークリット幾何符号には、すでにサイクル4が存在せず、この特性は、行および列の分離および削除（実施の形態1における分離および削除を含む）によっても変わらない。

第23図は、前述の第3図に示すユークリット幾何符号EG(2, 2²)の各列における「1」の行番号を示す図であり、この行列をcol(i, j)と表現する。col(i, j)において「1」の位置を示す多項式W(X)は、1番上の行に関して以下の(17)式のように表現できる。

$$W(X) = X^{1-1} + X^{3-1} + X^{4-1} + X^{12-1} \quad (17)$$

ユークリット幾何符号は、この一つが多項式を巡回シフトした形式で表現できるため、以下の(18)式のように表現できる。

$$W(X) = X^{(i-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+2)-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+3)-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+11)-1) \bmod (2^{2s}-1)}, \quad i=1, 2, \dots, 2^{2s}-1 \quad \dots (18)$$

そして、ユークリット幾何符号に存在するサイクル数6を削減する場合、たとえば、列の重みを4から2に分離する。すなわち、上記(18)式を前半部と後半部に分けて、以下の(19)式のように表現する。

$$W_1(X) = X^{(i-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+2)-1) \bmod (2^{2s}-1)}, \quad i=1,2,\dots,2^{2s}-1$$

$$W_2(X) = X^{((i+3)-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+11)-1) \bmod (2^{2s}-1)}, \quad i=1,2,\dots,2^{2s}-1 \quad \dots(19)$$

第24図は、第23図に示す行列を上記(19)式により分離して、列の重みを2にした場合の行列を示す図であり、この行列を $col_s2(i, j)$ と表現する。上記処理により分離した第24図の行列に対応するLDPC符号は、サイクル6をまったく持たない構成となる。なお、多項式をベースにした分離は、どの次数同士のペアでもよい。すなわち、以下の(20)式を用いて分離することとしてもよい。

$$W_1(X) = X^{(i-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+3)-1) \bmod (2^{2s}-1)}, \quad i=1,2,\dots,2^{2s}-1$$

$$W_2(X) = X^{((i+2)-1) \bmod (2^{2s}-1)} + X^{((i+11)-1) \bmod (2^{2s}-1)}, \quad i=1,2,\dots,2^{2s}-1 \quad \dots(20)$$

このように、重みが4のユークリット幾何符号であれば、上記の(19)式または(20)式を用いて列の重みを2に分離することによって、サイクル6を完全に除去できる。ただし、サイクル6を完全に除去できるのは、列の重みをすべて2に分離した場合である。したがって、重みが3以上の列が他に存在する場合、すなわち、「Irregular-LDPC符号」の場合は、サイクル6を削減することはできるが完全には除去できない。

第25図は、重み4の列を重み2の20列と重み4の5列に分離する手順として、上記 $col(i, j)$ を単純に前2列と後ろ2列に分離した場合の、行列 $col_s2_4(i, j)$ を示す図である。第25図の行列 $col_s2_4(i, j)$ では、サイクル6の数が35となる。一方、第26図は、上記式で分離した場合の行列 $col_s2_4'(i, j)$ を示す図である。第26図の行列 $col_s2_4'(i, j)$ では、サイクル6の数が33となり、第25図の場合よりも少なくなっていることがわかる。

このように、本実施の形態においては、特性劣化の要因となるユークリット幾何符号に存在するサイクル数6を削減するように、列の重みを分離することとし

たため、復号特性の向上を実現できる。

なお、上記実施の形態1および2においては、基本となる符号（基本行列）にユークリット幾何符号を用いることとしたが、これに限らず、「行と列の重みが一定」かつ「サイクル数が6以上」という条件を満たす行列であれば、たとえば、
5 射影幾何符号等の、ユークリット幾何符号以外の行列を用いることとしてもよい。

以上、説明したとおり、本発明によれば、まず、列の重みの最大値 d_1 を決定し、つぎに、列の重み d_1 に基づいてベースとなるユークリット幾何符号 $E \cdot G(2, 2^s)$ を選択し、つぎに、符号化率 (rate) を決定し、つぎに、上記ガウス近似法を用いてバリアブルノードの次数配分の生成関数 $\lambda(x)$ とチェック
10 ノードの次数配分の生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを導出し、つぎに、所定のブロック長 N から情報長 K を確定し、つぎに、上記所定の手順で情報長 K に対応した行の削除処理を行い、最後に、上記所定の手順で列の分割処理を行う。これにより、確定的で特性が安定し、かつ任意のアンサンブル、任意の符号長、任意の符号化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を、
15 短時間で容易に生成できる、という効果を奏する。

つぎの発明によれば、所定のアンサンブルに基づいてユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割し、分割後の行数から情報長を減算し、その後、前記アンサンブルにおける各重みの比率ができるだけ変わらないように前記減算結果に相当する行数を削除する。これにより、任意のアンサンブル、任意の
20 符号長、任意の符号化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を容易に生成できる、という効果を奏する。

つぎの発明によれば、基本のユークリット幾何符号から所定の行数を削除し、その後、前記アンサンブルに基づいて当該削除後のユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割する。これにより、任意のアンサンブル、任意の
25 符号長、任意の符号化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を容易に生成できる、という効果を奏する。

つぎの発明によれば、重み配分を、重み単位の重み総数が整数で、かつ重み単

位の重み総数の総和とユークリット幾何符号の「1」の総数とが等しくなるように調整することによって、より高精度な分割処理を実現できる、という効果を奏する。

5 つぎの発明によれば、ランダム系列のラテン方陣を作成することによって、符号特性の条件を正確に規定できる、という効果を奏する。

つぎの発明によれば、特性劣化の要因となるユークリット幾何符号に存在するサイクル数6を削減するように、列の重みを分離することとしたため、大幅に復号特性を向上させることができる、という効果を奏する。

10 つぎの発明によれば、まず、列の重みの最大値 d_1 を決定し、つぎに、列の重み d_1 に基づいてベースとなるユークリット幾何符号 $EG(2, 2^s)$ を選択し、つぎに、符号化率 (rate) を決定し、つぎに、上記ガウス近似法を用いてバリアブルノードの次数配分の生成関数 $\lambda(x)$ とチェックノードの次数配分の生成関数 $\rho(x)$ のアンサンブルを導出し、つぎに、所定のブロック長 N から情報長 K を確定し、つぎに、上記所定の手順で情報長 K に対応した行の削除処理を行

15 い、最後に、上記所定の手順で列の分割処理を行う構成とした。これにより、確定的で特性が安定し、かつ任意のアンサンブル、任意の符号長、任意の符号化率に対応した「Irregular-LDPC符号」用の検査行列を、短時間で容易に生成可能な検査行列生成装置を得ることができる、という効果を奏する。

20 産業上の利用可能性

以上のように、本発明にかかるLDPC符号用検査行列生成方法および検査行列生成装置は、誤り訂正符号としてLDPC符号を採用した通信システムに有用であり、特に、確定的で特性が安定した「Irregular-LDPC符号」を生成する装置に適している。

請求の範囲

1. Irregular-LDPC符号の検査行列を生成するためのLDPC符号用検査行列生成方法において、
 - 5 列の重みの最大値を決定する重み決定ステップと、
前記列の重みの最大値に基づいて、「行と列の重みが一定」かつ「サイクル数が6以上」という条件を満たす基本行列を決定する基本行列決定ステップと、
符号化率を決定する符号化率決定ステップと、
前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の
10 重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索ステップと、
所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出ステップと、
前記基本行列を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削
15 除ステップと、
前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割ステップと、
を含むことを特徴とするLDPC符号用検査行列生成方法。
- 20 2. ユークリット幾何符号を用いてIrregular-LDPC符号の検査行列を生成するためのLDPC符号用検査行列生成方法において、
列の重みの最大値を決定する重み決定ステップと、
前記列の重みの最大値に基づいてユークリット幾何符号を決定するユークリット幾何符号決定ステップと、
25 符号化率を決定する符号化率決定ステップと、
前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索ステップ

と、

所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出ステップと、

5 前記ユークリット幾何符号を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除ステップと、

前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割ステップと、

を含むことを特徴とするLDPC符号用検査行列生成方法。

10 3. 前記行削除ステップにあつては、

前記アンサンブルに基づいて前記ユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割し、分割後の行数から前記情報長を減算し、その後、前記アンサンブルにおける各重みの比率を調整しながら、前記減算結果に相当する行数を削除することを特徴とする請求の範囲第2項に記載のLDPC符号用検査行列生成方法。

15

4. 前記行削除ステップにあつては、

前記基本のユークリット幾何符号から所定の行数を削除し、その後、前記アンサンブルに基づいて当該削除後のユークリット幾何符号における各行の重みをランダムに分割することを特徴とする請求の範囲第2項に記載のLDPC符号用検査行列生成方法。

20

5. 前記アンサンブルの重み配分を、重み単位の重み総数が整数で、かつ重み単位の重み総数の総和とユークリット幾何符号の「1」の総数とが等しくなるように調整し、調整後のアンサンブルに基づいて前記分割処理を行うことを特徴とする請求の範囲第2項に記載のLDPC符号用検査行列生成方法。

25

6. 基本のランダム系列のラテン方陣を作成し、当該ラテン方陣に基づいて、前記ユークリット幾何符号における各行および各列から重み「1」を抽出することにより、各列および各行をランダムに分割することを特徴とする請求の範囲第2項に記載のLDPC符号用検査行列生成方法。

5

7. Irregular-LDPC符号の検査行列を生成するためのLDPC符号用検査行列生成方法において、

10 所定の多項式を用いて、「行と列の重みが一定」かつ「サイクル数が6以上」という条件を満たす基本行列における行または列の重みを分割し、特性劣化の要因となる「サイクル数6」を削減することを特徴とするLDPC符号用検査行列生成方法。

8. ユークリット幾何符号を用いてIrregular-LDPC符号の検査行列を生成するためのLDPC符号用検査行列生成方法において、

15 所定の多項式を用いて前記ユークリット幾何符号における行または列の重みを分割し、特性劣化の要因となる前記ユークリット幾何符号に存在する「サイクル数6」を削減することを特徴とするLDPC符号用検査行列生成方法。

20 9. Irregular-LDPC符号の検査行列を生成する検査行列生成装置において、

列の重みの最大値を決定する重み決定手段と、

前記列の重みの最大値に基づいて、「行と列の重みが一定」かつ「サイクル数が6以上」という条件を満たす基本行列を決定する基本行列決定手段と、

符号化率を決定する符号化率決定手段と、

25 前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索手段と、

所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出

手段と、

前記基本行列を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除手段と、

前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割手段と、

5

を備えることを特徴とする検査行列生成装置。

10. ユークリット幾何符号を用いてIrregular-LDPC符号の検査行列を生成する検査行列生成装置において、

10 列の重みの最大値を決定する重み決定手段と、

前記列の重みの最大値に基づいてユークリット幾何符号を決定するユークリット幾何符号決定手段と、

符号化率を決定する符号化率決定手段と、

15 前記符号化率を固定した状態で、かつガウスノイズが最大になるように、行の重みと列の重みの最適なアンサンブルを線形計画法で探索する重み探索手段と、

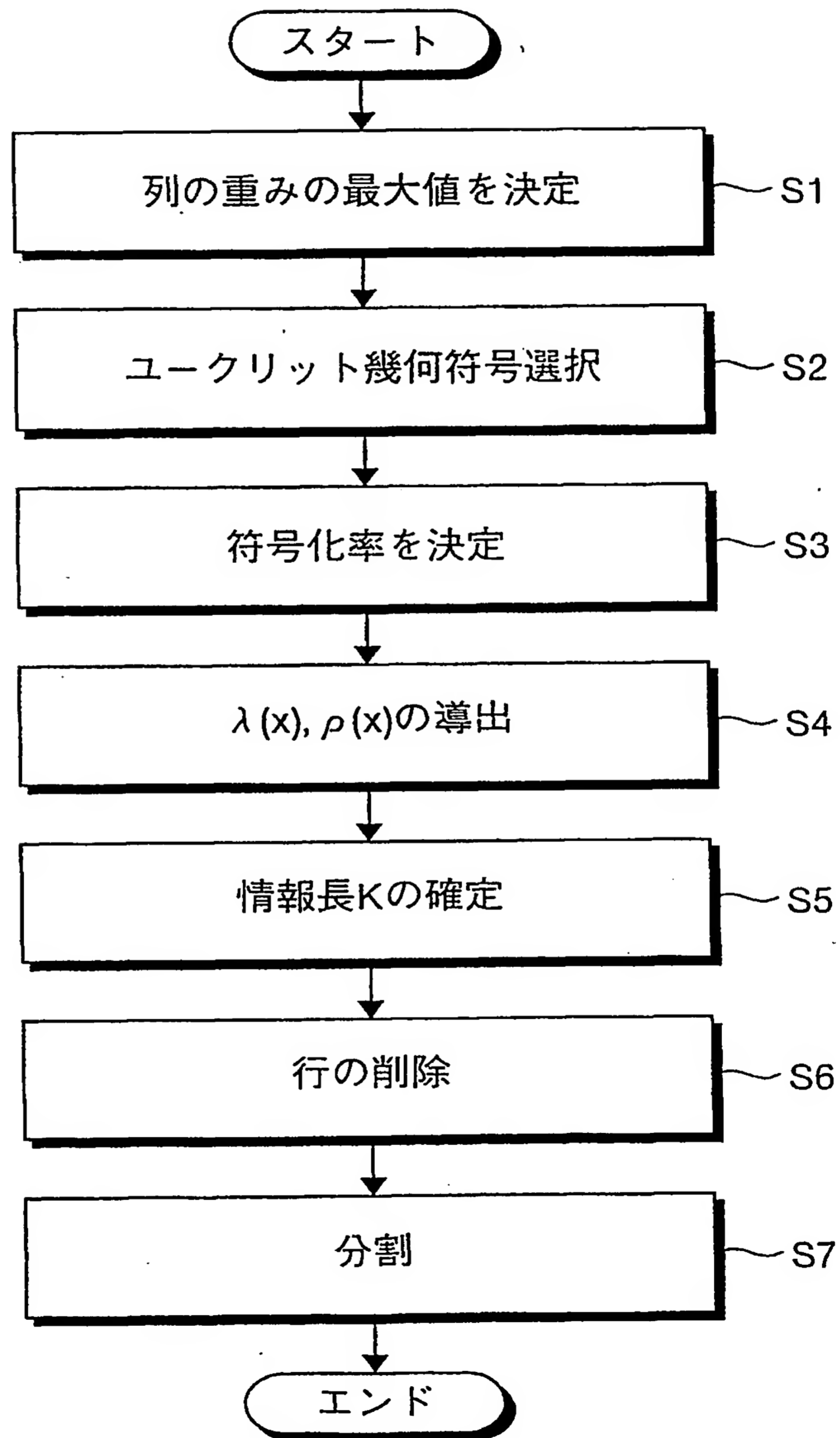
所定のブロック長および前記符号化率に基づいて情報長を算出する情報長算出手段と、

前記ユークリット幾何符号を用いて、前記情報長に基づいた所定の行の削除処理を行う行削除手段と、

20 前記行削除後の行列の行または列の重みを所定の手順でランダムに分割する分割手段と、

を備えることを特徴とする検査行列生成装置。

第1図



第 2 図

良好な rate=0.5の符号のアンサンブル

D ₁	32	
Rate	0.5	
	X	λ_x
	2	0.179592
	3	0.147781
	6	0.177941
	7	0.000132
	8	0.00017
	25	0.01391
	26	0.440164
	31	0.001142
	32	0.039168
	X	ρ_x
	10	0.3125
	11	0.6875

第3図

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1				1								1	1	
2		1				1								1	1
3	1		1				1								1
4	1	1		1				1							
5		1	1		1				1						
6			1	1		1				1					
7				1	1		1				1				
8					1	1		1				1			
9						1	1		1				1		
10							1	1		1				1	
11								1	1		1				1
12	1								1	1		1			
13		1								1	1		1		
14			1								1	1		1	
15				1								1	1		1

第 4 図

Row(i,j)=	1	5	13	14
	2	6	14	15
	1	3	7	15
	1	2	4	8
	2	3	5	9
	3	4	6	10
	4	5	7	11
	5	6	8	12
	6	7	9	13
	7	8	10	14
	8	9	11	15
	1	9	10	12
	2	10	11	13
	3	11	12	14
	4	12	13	15

第 5 図

昇順並べ替え

Row'(i,j)=	1	5	13	14
	1	3	7	15
	1	2	4	8
	1	9	10	12
	2	6	14	15
	2	3	5	9
	2	10	11	13
	3	4	6	10
	3	11	12	14
	4	5	7	11
	4	12	13	15
	5	6	8	12
	6	7	9	13
	7	8	10	14
	8	9	11	15

第 6 図

下から5行削除

Row_5'(i,j)=	1	5	13	14
	1	3	7	15
	1	2	4	8
	1	9	10	12
	2	6	14	15
	2	3	5	9
	2	10	11	13
	3	4	6	10
	3	11	12	14
	4	5	7	11

第 7 図

列番号	列に含まれる1の数
1	4
2	4
3	4
4	3
5	3
6	2
7	2
8	1
9	2
10	3
11	3
12	2
13	2
14	3
15	2

第 8 図

dl	4		
	X	λ_x	No.
	1	0.0250	1
	2	0.3000	6
	3	0.3750	5
	4	0.3000	3
	X	ρ_x	No.
	4	1	10

第 9 図

dl	32		
	X	λ_x	No.
	21	0.0016	2
	22	0.0272	33
	23	0.0646	75
	24	0.0989	110
	25	0.1733	185
	26	0.2309	237
	27	0.1791	177
	28	0.1007	96
	29	0.0467	43
	30	0.0112	10
	31	0.0070	6
	32	0.0588	49
	X	ρ_x	No.
	32	1	834

第10図

分割テーブル

2x16	3x10 +2x1	6x5 +2x1	7x4 +2x2	8x4	25x1 +7x1 or 25x1 +2x2 +3x1	26x1 +6x1 or 26x1 +3x2 or 26x1 +2x3	32x1
------	--------------	-------------	-------------	-----	--	--	------

第11図

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	x	λ x							x	λ x
バリアブルノード (列)	2	0.179592478	4792.964	2396.482	2396	4792	4792	2396	2	0.179556355
	3	0.147780554	3943.967	1314.656	1315	3945	3942	1314	3	0.147706835
	6	0.177941159	4748.894	791.4823	791	4746	4740	790	6	0.177607914
	7	0.000131985	3.522412	0.503202	1	7	0	0	7	0
	8	0.000169917	4.534747	0.566843	1	8	0	0	8	0
	25	0.013909921	371.228	14.84912	15	375	375	15	25	0.014051259
	26	0.440164354	11747.11	451.8118	452	11752	11752	452	26	0.440347722
	31	0.001141731	30.47051	0.98292	1	31	31	1	31	0.001161571
	32	0.039167902	1045.313	32.66603	33	1056	1056	33	32	0.039568345
		1	26688	5004	5005	26712	26688	5001		1
	x	ρ x							x	ρ x
チェックノード (行) 合計	10	0.3125	8340	834	834	8340	8340	834	10	0.3125
	11	0.6875	18348	1668	1668	18348	18348	1668	11	0.6875
		1	26688	2502	2502	26688	26688	2502		1
rate		0.5								0.49970006

・行列内の1の総数TP=(1023-189)x32=26688

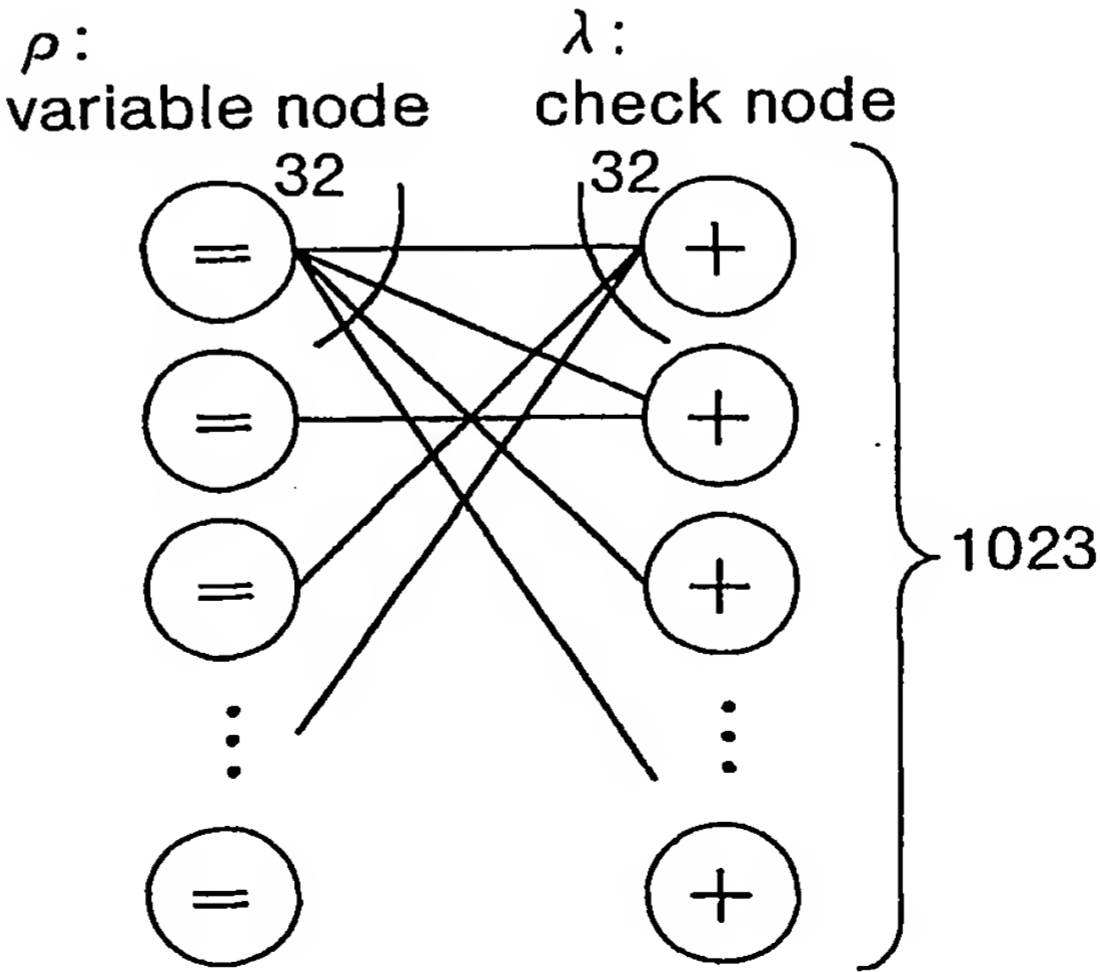
第12図

DI	32		
Rate	0.5		
	X	λ_x	No.
	2	0.179556355	2396
	3	0.147706835	1314
	6	0.177607914	790
	7	0	0
	8	0	0
	25	0.014051259	15
	26	0.440347722	452
	31	0.001161571	1
	32	0.039568345	33
	X	ρ_x	No.
	10	0.3125	834
	11	0.6875	1668
σ_{GA}	0.951482654		
$SNR_{norm}(GA)$	0.2449 dB		

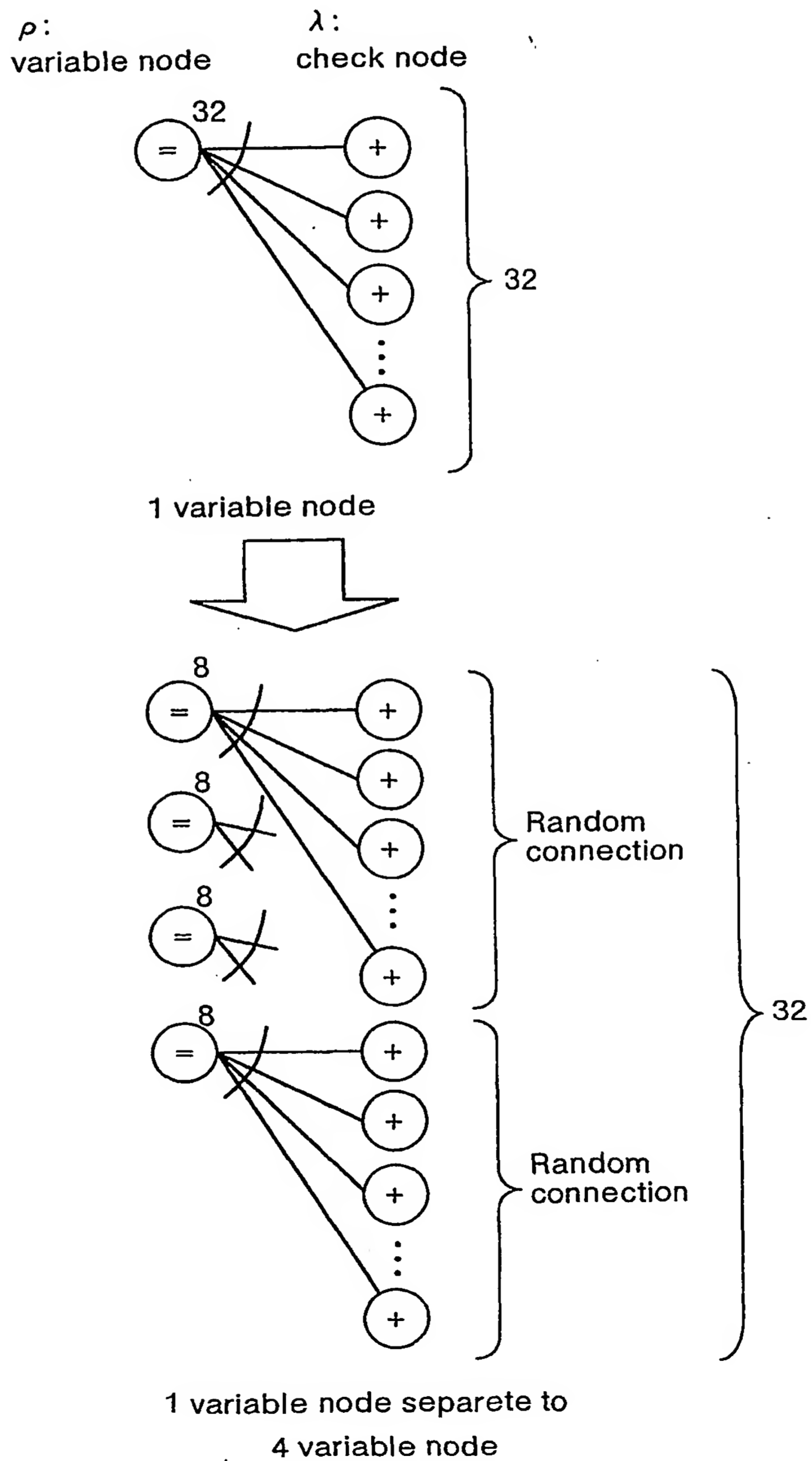
第13図

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													

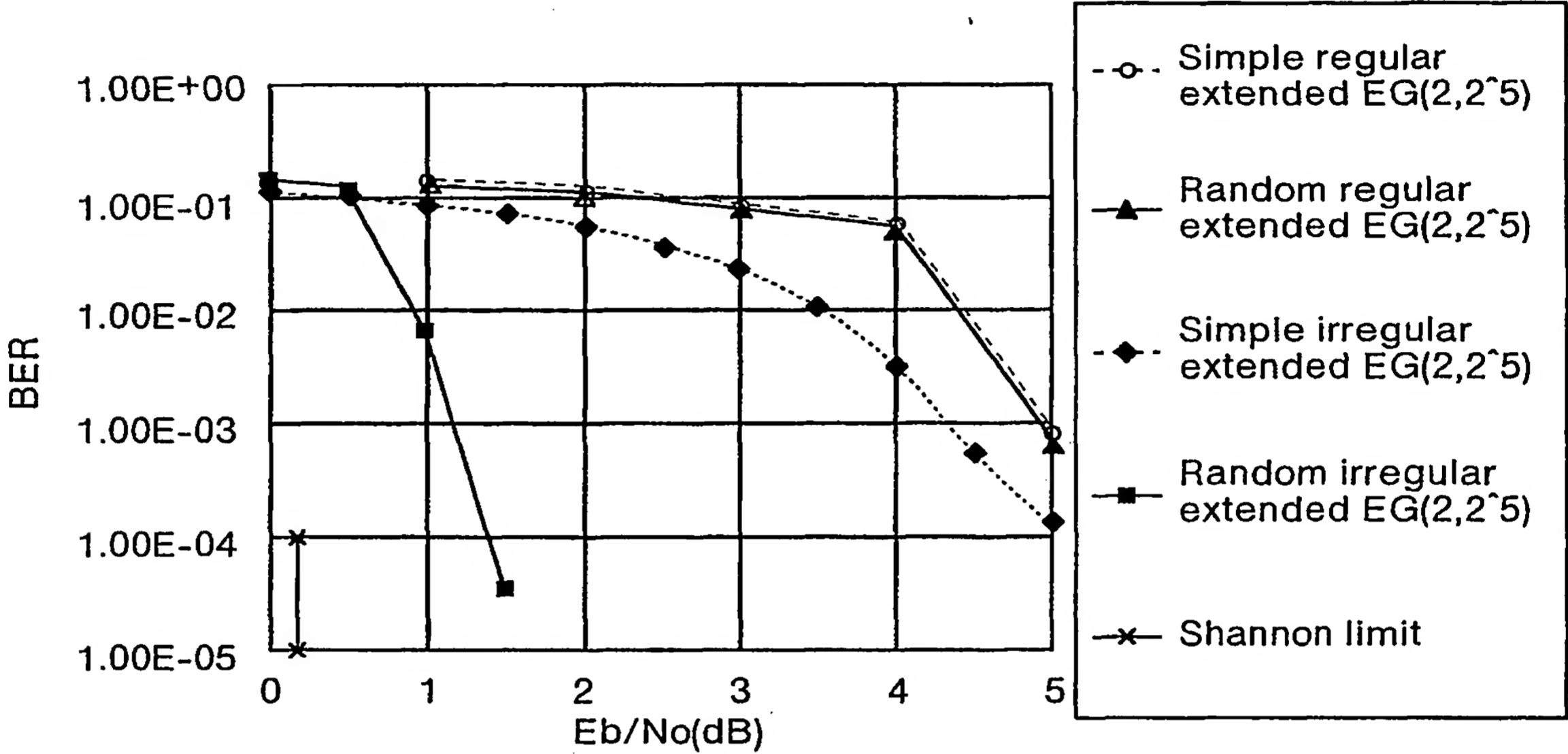
第14図



第15図



第16図



第17図

DI	32		
Rate	0.5		
	X	λ_x	No.
	16	1	2046
	X	ρ_x	No.
	32	1	1023

第18図

DI	32		
Rate	0.5		
	X	λ_x	No.
	2	0.178580156	2923
	3	0.149376833	1630
	6	0.02016129	110
	7	0.219819159	1028
	8	0.005865103	24
	32	0.426197458	436
	X	p_x	No.
	10	0.3125	1023
	11	0.6875	2046

第19図

		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32																																			
GO	2	J																																			
		LB(1) LB(2) LB(3) LB(4) LB(5) LB(6) LB(7) LB(8) LB(9) LB(10) LB(11) LB(12) LB(13) LB(14) LB(15) LB(16) LB(17) LB(18) LB(19) LB(20) LB(21) LB(22) LB(23) LB(24) LB(25) LB(26) LB(27) LB(28) LB(29) LB(30) LB(31) LB(32)																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
		C(1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32			
		C(2)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	14	17	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27			
		C(3)	4	6	9	12	15	18	21	24	27	30	7	11	2	5	8	11	31	16	20	23	26	29	32	22	1	4	7	10	13	16	19	22			
		C(4)	8	8	12	16	20	24	28	32	8	3	18	23	15	19	23	27	11	15	2	6	10	14	18	9	26	30	24	1	5	9	13	17			
		C(5)	16	5	10	15	20	25	30	5	3	17	13	29	10	28	10	1	6	28	14	21	26	31	21	4	20	14	19	14	29	26	2	7	12		
		C(6)	32	6	12	18	24	30	5	12	11	26	23	3	22	4	24	16	22	8	32	3	9	15	6	27	7	2	8	4	20	18	32	1	7		
		C(7)	27	7	14	21	28	3	11	19	19	7	6	14	9	17	1	31	1	25	13	22	29	20	28	13	31	27	23	31	11	10	25	32	2		
		C(8)	17	8	16	24	32	8	17	26	27	16	16	25	21	30	15	9	17	5	31	4	12	4	13	22	18	15	12	21	2	2	18	26	28		
		C(9)	31	9	18	27	3	13	23	3	6	25	26	10	8	6	29	24	12	22	12	23	32	25	20	8	5	3	1	11	30	31	11	20	24		
		C(10)	25	10	20	30	7	18	29	10	14	6	9	21	20	19	6	2	28	2	30	5	15	9	5	31	29	28	16	16	27	1	21	23	4	14	19
		C(11)	13	11	22	2	11	23	4	17	22	15	19	32	32	20	17	7	19	11	24	18	30	27	17	16	16	16	16	12	15	27	8	14	14	19	
		C(12)	26	12	24	5	15	28	10	24	30	24	29	6	7	8	11	32	23	16	29	6	1	14	12	3	3	4	5	18	3	7	20	2	9	2	
		C(13)	15	13	13	8	19	1	16	31	1	5	2	17	19	21	25	10	2	13	10	25	21	19	19	26	27	29	31	8	31	28	13	27	4	4	
		C(14)	30	14	28	11	23	6	22	1	9	14	12	28	31	10	2	25	18	30	28	7	4	3	4	12	14	17	20	25	22	20	6	21	31	31	
		C(15)	23	15	30	14	27	11	28	8	17	23	22	2	6	23	16	3	13	10	9	26	24	24	26	21	1	5	9	15	13	12	29	15	26	26	
		C(16)	9	16	32	17	31	16	3	15	25	32	32	13	18	12	30	18	29	27	27	8	7	8	11	7	25	30	24	5	4	4	22	9	21	21	
		C(17)	18	17	1	20	2	21	9	22	4	4	5	24	30	25	7	11	8	7	8	27	27	27	18	30	12	18	13	32	32	25	15	3	16	16	
		C(18)	29	18	3	23	6	26	15	29	12	13	15	9	5	1	21	26	24	24	26	9	10	13	3	16	23	6	2	22	23	17	8	28	11	11	
		C(19)	21	19	5	26	10	31	21	6	20	22	25	20	17	14	12	4	3	4	7	28	30	18	25	2	10	31	28	12	14	9	1	22	6	6	
		C(20)	5	20	7	29	14	4	27	13	28	31	8	31	29	27	26	19	19	21	25	10	13	2	10	25	21	19	17	2	5	1	31	16	1	1	
		C(21)	10	21	9	32	18	9	2	20	7	3	18	5	4	3	3	12	14	1	6	29	16	23	32	11	8	7	6	29	24	30	24	10	28	28	
		C(22)	20	22	11	1	22	14	8	27	15	12	28	16	16	16	17	27	30	18	24	11	19	7	17	20	32	32	19	15	22	17	4	23	4	23	
		C(23)	3	23	13	4	26	19	14	4	23	21	1	27	28	29	31	5	9	15	5	30	2	28	2	6	19	20	21	9	6	14	10	29	18	18	
		C(24)	6	24	15	7	30	24	20	11	31	30	11	1	3	5	8	20	25	32	23	12	22	12	24	29	6	8	10	26	25	6	3	23	13	13	
		C(25)	12	25	17	10	1	29	26	18	2	2	21	12	15	18	22	13	4	12	4	31	5	17	9	15	30	21	25	16	16	27	26	17	8	8	
		C(26)	24	26	19	13	5	2	32	25	10	11	31	23	27	31	13	28	20	29	22	13	25	1	31	1	17	9	14	6	7	19	11	3	3	3	
		C(27)	11	27	21	16	9	7	1	32	18	20	4	8	2	7	27	6	15	9	3	32	8	22	16	24	4	22	3	23	26	11	12	5	30	30	
		C(28)	22	28	23	19	13	12	7	2	26	29	14	19	14	20	4	21	31	26	21	14	28	6	1	10	28	10	29	13	17	3	5	30	25	25	
		C(29)	7	29	25	22	17	13	9	5	1	24	30	26	9	18	14	10	6	2	15	11	27	23	19	15	23	18	3	8	32	28	24	20	20	20	
C(30)	14	30	27	25	21	22	19	16	13	10	7	4	1	22	32	29	26	23	20	16	31	11	8	5	2	11	7	30	27	24	21	18	15	15			
C(31)	28	31	29	28	25	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	17	14	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	10			
C(32)	19	32	31	29	32	31	30	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	5			

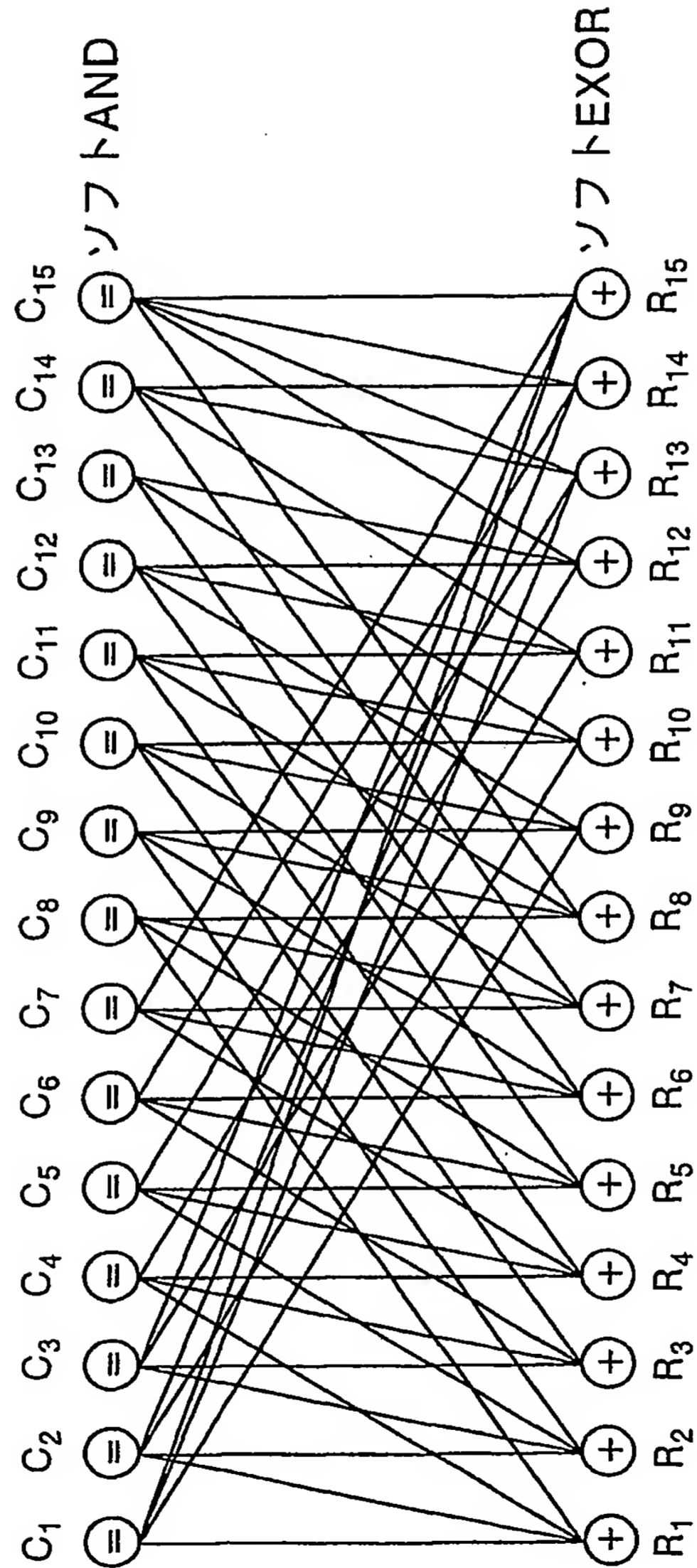
Basic Random sequence

permutation pattern of basic random sequence

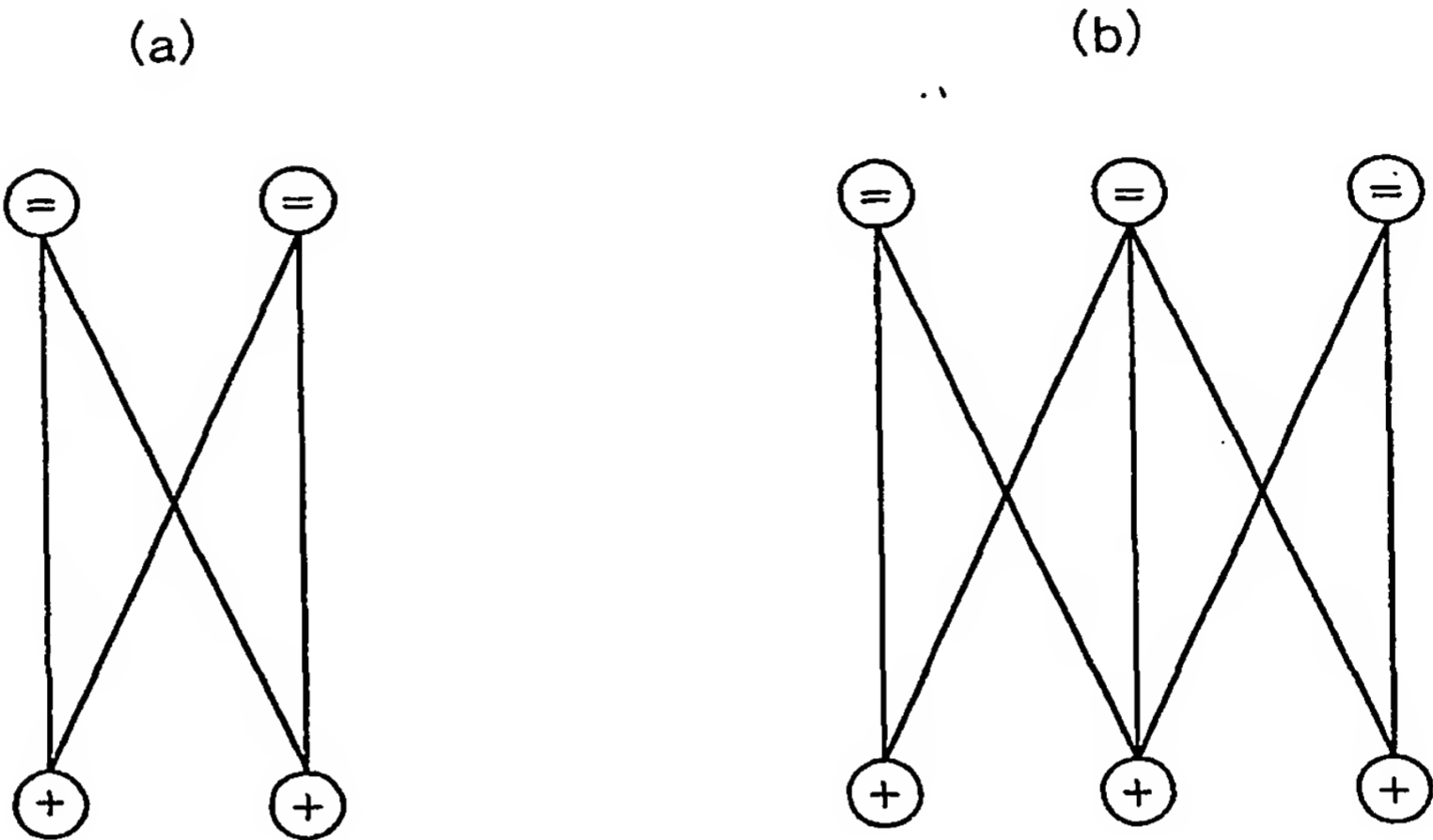
第20図

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
$L_q(1)$	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9
$L_q(2)$	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10
$L_q(3)$	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16
$L_q(4)$	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24
$L_q(5)$	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25
$L_q(6)$	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28
$L_q(7)$	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23
$L_q(8)$	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5
$L_q(9)$	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8
$L_q(10)$	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12
$L_q(11)$	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31
$L_q(12)$	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14
$L_q(13)$	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30
$L_q(14)$	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21
$L_q(15)$	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4
$L_q(16)$	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6
$L_q(17)$	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17
$L_q(18)$	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7
$L_q(19)$	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15
$L_q(20)$	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29
$L_q(21)$	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2
$L_q(22)$	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3
$L_q(23)$	22	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27
$L_q(24)$	26	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22
$L_q(25)$	18	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26
$L_q(26)$	1	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18
$L_q(27)$	20	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1
$L_q(28)$	32	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20
$L_q(29)$	11	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32
$L_q(30)$	13	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11
$L_q(31)$	19	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13
$L_q(32)$	9	10	16	24	25	28	23	5	8	12	31	14	30	21	4	6	17	7	15	29	2	3	27	22	26	18	1	20	32	11	13	19

第21図



第22図



第23図

Col(i,j)=	1	3	4	12
	2	4	5	13
	3	5	6	14
	4	6	7	15
	1	5	7	8
	2	6	8	9
	3	7	9	10
	4	8	10	11
	5	9	11	12
	6	10	12	13
	7	11	13	14
	8	12	14	15
	1	9	13	15
	1	2	10	14
	2	3	11	15

第24図

Col_s2(i,j)=	1	3
	2	4
	3	5
	4	6
	5	7
	6	8
	7	9
	8	10
	9	11
	10	12
	11	13
	12	14
	13	15
	14	1
	15	2
	4	12
	5	13
	6	14
	7	15
	1	8
	2	9
	3	10
	4	11
	5	12
	6	13
	7	14
	8	15
	1	9
	2	10
	3	11

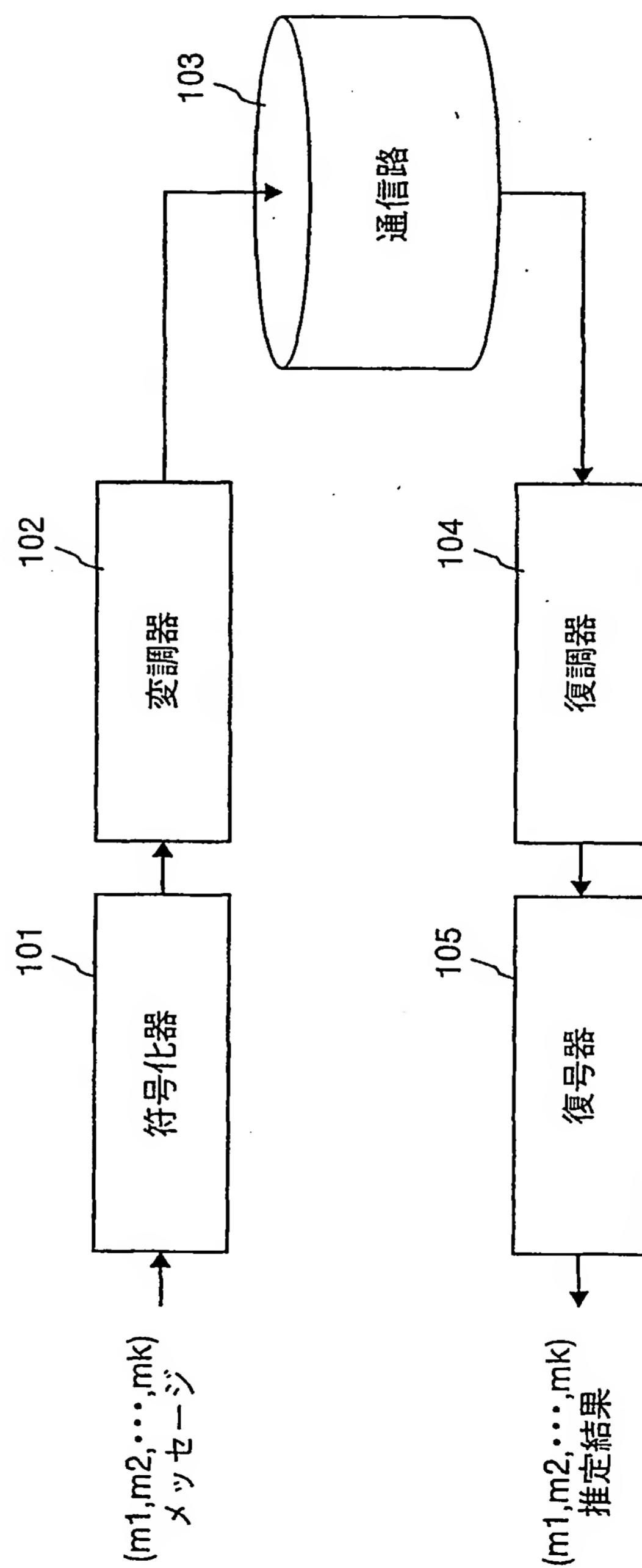
第25図

Col_s2_4(i,j)=	1	3	0	0
	2	4	0	0
	3	5	0	0
	4	6	0	0
	1	5	0	0
	2	6	0	0
	3	7	0	0
	4	8	0	0
	5	9	0	0
	6	10	0	0
	4	12	0	0
	5	13	0	0
	6	14	0	0
	7	15	0	0
	7	8	0	0
	8	9	0	0
	9	10	0	0
	10	11	0	0
	11	12	0	0
	12	13	0	0
	7	11	13	14
	8	12	14	15
	1	9	13	15
	1	2	10	14
	2	3	11	15

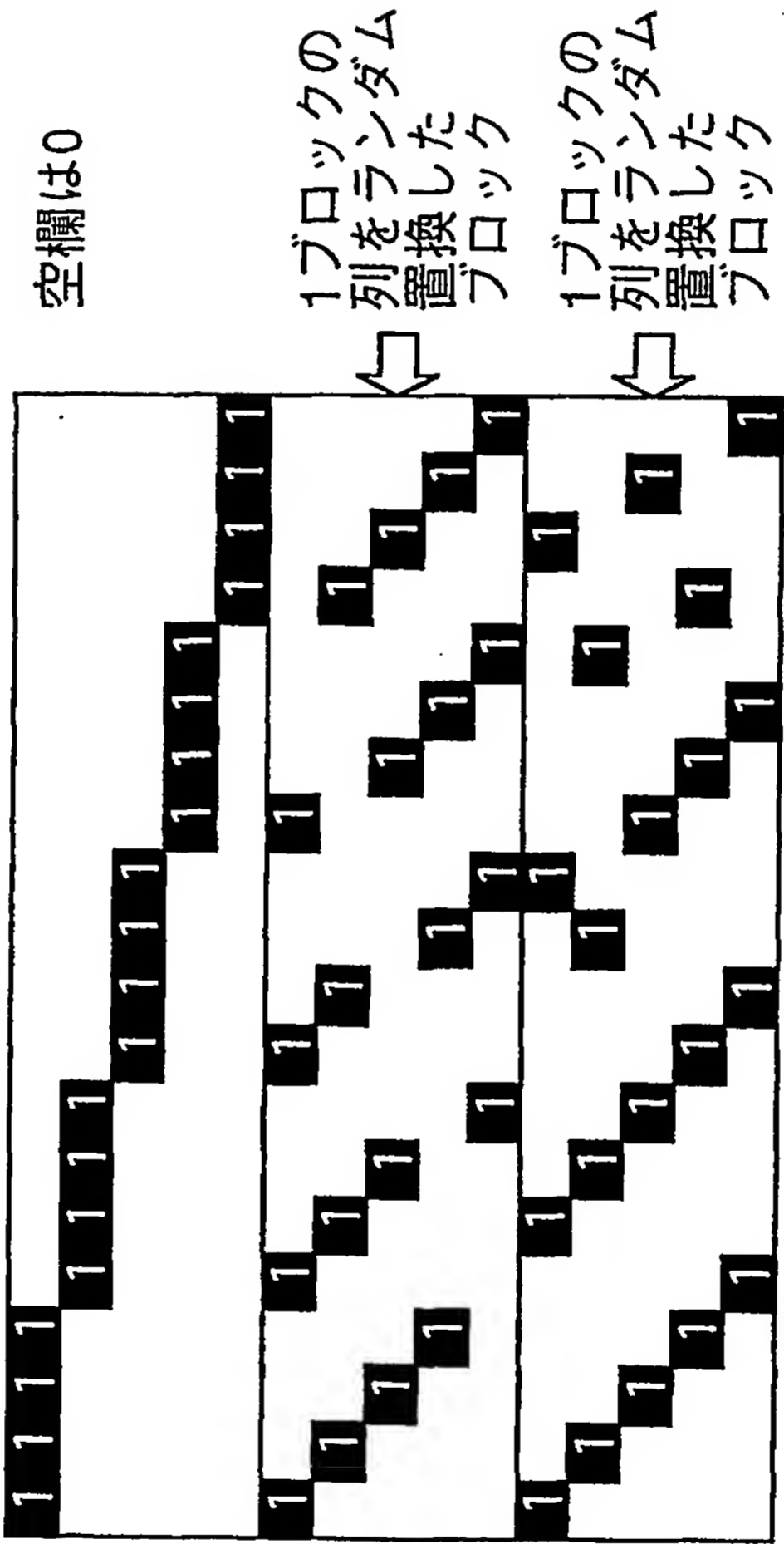
第26図

Col_s2_4'(i,j)=	1	3	0	0
	2	4	0	0
	3	5	0	0
	4	6	0	0
	5	7	0	0
	6	8	0	0
	7	9	0	0
	8	10	0	0
	9	11	0	0
	10	12	0	0
	4	12	0	0
	5	13	0	0
	6	14	0	0
	7	15	0	0
	1	8	0	0
	2	9	0	0
	3	10	0	0
	4	11	0	0
	5	12	0	0
	6	13	0	0
	7	11	13	14
	8	12	14	15
	1	9	13	15
	1	2	10	14
	2	3	11	15

第27図



第28図



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/02331

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ H03M13/19

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ H03M13/19

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Jilei H. Siegel P.H. Milstein L.B. Pfister D. Multilevel coding with low-density parity-check component codes, IEEE GLOBECOM'01 Global Tele- communications Conference, 2001, Vol.2, pages 1016 to 1020	1-10
A	Ludy M.G., Mitzenmacher M., Shokronllahi M.A., Spielman D.A., Improved low-density parity-check codes using irregular graphs, IEEE Transactions Information Theory, Vol.47, No.2, pages 585 to 598	1-10
A	Sason I., Shamai S., Improved upper bounds on the ensemble performance of ML decoded low density parity check codes, IEEE Communications Letters, Vol.4, No.3, pages 89 to 91	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
26 May, 2003 (26.05.03)

Date of mailing of the international search report
10 June, 2003 (10.06.03)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/02331

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Sason I., Shamai S., On improved bounds on the decoding error probability of block codes over interleaved fading channels, with applications to turbo-like codes, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.47, No.6, pages 2275 to 2299	1-10
A	Sae-Young Chung., Richaldson T.J., Urbanke R.L., Analysis of sum-product decoding of low-density parity-check codes using a Gaussian approximation, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.47, No.2, pages 657 to 670	1-10

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁷ H03M13/19

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁷ H03M13/19

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	Jilei H. Siegel P.H. Milstein L.B. Pfister D. Multilevel coding with low-density parity-check component codes, IEEE GLOBECOM'01 Global Telecommunications Conference, 2001 Vol. 2, p. 1016-1020	1-10
A	Ludy M.G. Mitzenmacher M. Shokronllahi M.A. Spielman D.A. Improved low-density parity-check codes using irregular graphs, IEEE Transactions Information Theory, Vol.47, No.2 p. 585-598	1-10

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

26.05.03

国際調査報告の発送日

10.06.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

近藤 聡



5K

8730

電話番号 03-3581-1101 内線 3555

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	Sason I. Shamai S. Improved upper bounds on the ensemble performance of ML decoded low density parity check codes, IEEE Communications Letters, Vol.4, No.3, p.89-91	1 - 1 0
A	Sason I. Shamai S. On improved bounds on the decoding error probability of block codes over interleaved fading channels, with applications to turbo-like codes, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.47, No.6, p.2275-2299	1 - 1 0
A	Sae-Young Chung. Richaldson T.J. Urbanke R.L. Analysis of sum-product decoding of low-density parity-check codes using a Gaussian approximation, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.47, No.2, p.657-670	1 - 1 0